青海湖入湖口水温演变初步研究

谢 刚[1]， 王甜甜[1,2,3]， 于 涛[1]， 董靖玮[2,3]， 陈世强[2,3]，
王梦晓[2,3]， 张圣杰[2,3]， 张浩铭[2,3]

（1. 兰州理工大学石油化工学院，甘肃 兰州 730050；2. 中国科学院西北生态环境资源研究院，冰冻圈科学与冻土工程重点实验室，甘肃 兰州 730000；3. 中国科学院青海湖综合观测研究站，青海 刚察 812300）

摘 要：受全球气候变暖的影响，青藏高原湖泊、河流的温度显著升高，水温变化与水生生物的繁育息息相关，但目前对于青海湖裸鲤洄游产卵的重要场所——河流入湖口的水温研究较少，水温变化对于裸鲤产卵的影响也尚不明确。因此本研究基于刚察气象站观测数据、中国区域地面气象要素驱动数据集（CMFD）、欧洲中期天气预报中心第五代陆面再分析数据集（ERA5-Land）、第六次国际耦合模式比较计划（CMIP6）的多模式数据，尝试利用Fresh water Lake Model（简称FLake模式）模拟青海湖最大支流布哈河入湖口处水温并评估其适用性，探讨了再分析数据和CMIP6多模式数据驱动模拟历史（1981—2014年）水温的集合的优越性，预估了未来时期（2024—2100年）三种情景下的水温演变及成因，结果表明：（1）CMFD和ERA5-Land模拟水温的集合优于单个模式的模拟水温且在短期和长期模拟结果精度都较好，CMIP6多模式长期的模拟水温集合优于单个模式的模拟水温，可以较好的再现再分析数据模拟水温的集合。（2）未来布哈河入湖口的水温随着排放强度的增加显著升高，与水温呈正相关的气象因子从大到小依次为气温、比湿、向下长波辐射和向下短波辐射，呈负相关的气象因子是风速；除远期高排放情景（SSP585）的向下短波辐射，其他情景的气象因子与水温的关系均通过了95%的显著性检验。（3）近期（2024—2040年），三种情景的水温较历史时期均有少许升高，水温间的差异不大，青海湖裸鲤产卵的窗口期略微缩短，水温升高会对裸鲤的产卵造成轻微影响；中期（2041—2060年），三种情景的水温进一步升高，水温间的差异逐渐显现，裸鲤的产卵窗口期明显缩短，水温升高对裸鲤的产卵有一定的危害；远期（2081—2100年），三种情景的水温差异更显著，SSP126和SSP245情景的升高速率减慢；SSP585情景的水温升高速率依旧加快，水温持续升高导致裸鲤的产卵窗口期显著缩短，一定程度限制了青海湖裸鲤的产卵活动。

关键词：布哈河入湖口；FLake模式；CMIP6预估；水温；青海湖

青藏高原位于中国西南部，是地球上海拔最高、面积最大的高原，是全球气候变化最为敏感和脆弱的区域之一，平均海拔4000 m以上[1]，由于独特的地理位置及生态环境，该地区具有丰富的自然资源与生物多样性，是全球所关注的热点地区。青藏高原湖泊、河流众多且分布密集，是我国乃至亚洲的重要生态安全屏障区和全球生物多样性保护重点地区[2]。

湖泊、河流作为陆地水圈的重要组成部分，对维护生态环境的稳定具有重要作用[3]。然而自20世纪50年代以来，全球增温迅速[4]，气候变暖导致湖泊温度上升，蒸发量增加，湖泊底部的溶解氧减少，对整个湖泊生态系统造成了许多不利影响[5]。青藏高原的增暖速率高于全球和北半球，近50 a青藏高原平均变暖速率为0.36 ℃·$(10a)^{-1}$，约为全球平均变暖速率[0.19 ℃·$(10a)^{-1}$]的2倍[6]。全球范围内，夏季湖表温度整体上以0.34 ℃·$(10a)^{-1}$的趋势增加[7]，尤其是青藏高原地区，其中31个湖泊表层水温升高，平均升温速率为0.55±0.33 ℃·$(10a)^{-1}$[8]，70%的湖泊湖表温度呈增温趋势，增温速率为0.76 ℃·$(10a)^{-1}$[9]。例如，纳木错1979—2012年的水温以0.52 ℃·$(10a)^{-1}$的速率升高[10]；青海湖在2015—

收稿日期：2024-04-08； **修订日期**：2024-06-19
基金项目：甘肃省自然科学基金（22JR5RA073）；国家自然科学基金项目（42275044）；中国科学院"西部之光"项目（E129030101，Y929641001）
作者简介：谢刚（1977-），男，副教授，主要从事气候变化与生态环境研究. E-mail: xiegang@lut.edu.cn
通讯作者：陈世强. E-mail: csq@lzb.ac.cn

2100年处于SSP585(高排放情景)下湖表温度以0.69 ℃·(10a)$^{-1}$的速率升高[11],黄河流经的鄂陵湖-循化河段的水温在1958—2008年呈显著的增加趋势[12];近40 a来,长江源区的沱沱河流域5—10月水温也呈现出升温趋势[13]。

气候变化会直接影响湖泊、河流温度的变化,水温升高会对湖泊、河流的水文循环及水生生物的生存繁育产生一系列影响[14]。尼斯库利河鲑鱼生长季节时河口的平均水温从当前的10.73±3.78 ℃上升到2100年的14.22±3.18 ℃,整个夏季水温达到亚致死的水温从2.3%增加到15.9%[15];美国西北部高原河流温度的上升会使几种溯河产卵的鲑鱼聚集在冷水源,不太容易返回到产卵地[16]。青海湖裸鲤是青藏高原最大的湖泊——青海湖中重要的野生经济型鱼类[17],青海湖未来时期水温升高会使裸鲤的生长受到威胁[18],但是目前对其产卵的河流入湖口区域水温演变研究较少,产卵对未来水温变化的适应性也未可知。

因此,本研究基于布哈河入湖口观测水温、刚察气象站观测数据、CMFD和ERA5-Land再分析数据和CMIP6多模式数据,尝试利用FLake湖泊模式模拟布哈河入湖口历史(1981—2014年)及未来时期(2024—2100年)的水温,预估布哈河入湖口水温演变及分析其影响因素机制,并探讨水温演变对青海湖裸鲤产卵的可能影响。研究结果将有利于更好地了解入湖口的水温演变特征,并为青藏高原生态文明建设及应对气候变化提供一定的科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

青海湖(36.53°~37.25°N,99.60°~100.78°E)位于青藏高原东北部,海拔3200 m左右,是我国面积最大的内陆咸水湖[19](图1),年平均气温2.5 ℃,年平均水温6.3 ℃[20]。布哈河位于青海省海西蒙古族藏族自治州天峻县,是青海湖水系最大的河流[21],下游主河道宽41~160 m,水深0.4~1.6 m,布哈河作为青海湖最大支流,是青海湖裸鲤产卵场所之一[22],布哈河入湖口宽约150 m,流速约为0.30 m·s^{-1},深度约为1.5 m[23]。

1.2 研究数据

1.2.1 观测数据 水温观测地点在布哈河水文河口(36.99°N,99.80°E),海拔约为3195 m[24],距离入湖口约5 km,观测时间集中在2008年7—9月,水温观测在布哈河表层[25];选择距离布哈河入湖口最近的刚察气象站(37.26°N,100.12°E)逐日观测数据,源自国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/),海拔3301.5 m[18]。

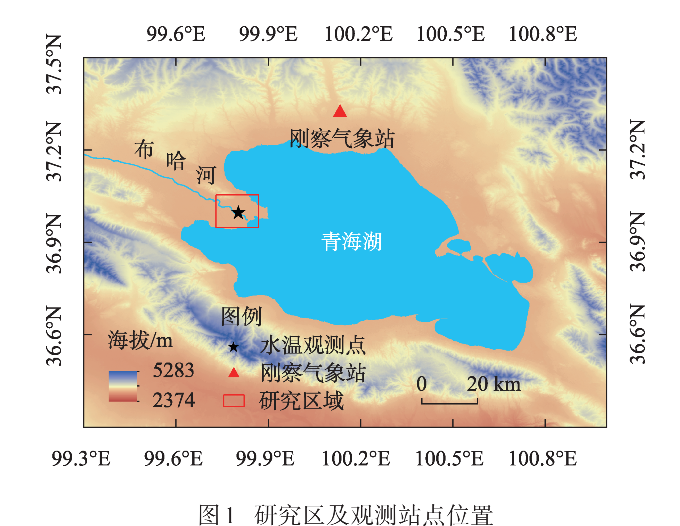


图1 研究区及观测站点位置

Fig. 1 Location of study area and observation site

1.2.2 再分析数据 本文选择的再分析数据集为中国区域地面气象要素驱动数据集CMFD(China Meteorological Forcing Dataset)和欧洲中期天气预报中心第五代陆面再分析数据集ERA5-Land(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF) Reanalysis v5-Land)。

CMFD是利用国际现有的卫星遥感数据和再分析数据融合中国气象局常规气象观测数据制作而成(1979—2018年)[26],空间分辨率为0.1°,时间分辨率为3 h,与其他同类型数据相比准确性较高[27],广泛应用于湖泊流域变化研究[28-29]。ERA5-Land再分析数据集(1950年至今)使用物理定律将模型数据与来自世界各地的观测结果相结合[30],形成一个全球完整且一致的数据集,空间分辨率为0.1°,时间分辨率为1 h,比ERA5分辨率更高,可以准确描述历史气候状况。通过对1979—2014年青海湖再分析数据气象场的评估,得出CMFD和ERA5-Land再分析数据集合优于单个数据[11]。

1.2.3 CMIP6气候模式资料 CMIP6(Coupled Model Intercomparison Projects 6)为第六次国际耦合模式比较计划,是二十多年来耦合模式比较计划实验中参与模式数量最为庞大的一次,包括历史(1850—2014年)气候模拟数据和未来(2015—2100年)气候预估数据[31]。CMIP6基于不同的共享社会经济路径

(SSP)及最新的人为排放趋势,预估了不同社会共享路径和温室气体排放情景下的未来气候变化趋势,在我国已得到一定范围的应用[32]。本研究选取的低辐射强迫情景SSP126(温室气体排放量低)、中度辐射强迫情景SSP245(维持当前社会发展趋势)和高辐射强迫情景SSP585(温室气体排放量高)目前广泛应用于气候变化的研究中。

鉴于CMIP6不同模式历史数据全面性和在高原上的代表性,本文选取CMIP6的CMCC-CM2-SR5、MIROC6和MPI-ESM1-2-LR模式(表1)[33],时间间隔3 h的平均数据作为湖泊模型模拟驱动数据,变量为温度、风速、湿度、长波辐射、短波辐射,数据源自地球系统网格协会网(https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/)。对比青海湖历史时期(1979—2014年)的CMIP6三个模式及集合与刚察气象站的气温、风速、比湿的统计量和年际变率,得出CMIP6的多模式集合优于单个模式[11]。

由于CMIP6历史时期的时间跨度为1850—2014年,因此本研究综合CMFD和ERA5-Land选取历史时期为1979—2014年,未来时期根据IPCC第六次报告划分为近期(2024—2040年)、中期(2041—2060年)、远期(2081—2100年)。

1.3 FLake湖泊模式

1.3.1 *模式介绍* FLake(Freshwater Lake Model)属于湖泊模型中的体积模式,是基于自相似理论发展起来的模型,计算量较小。FLake模式可以模拟湖泊垂直温度廓线的演变及不同深度层的能量收支状况,时间尺度从几个小时到多年[34],可以很好地模拟湖表温度及其季节、年际变化[35]。目前,FLake湖泊模式对青海湖的热力状况和表层水温模拟结果较好[36-37],且布哈河入湖口较宽,流速缓慢,上下游水温差异不大[23],水体环境稳定并与青海湖水体接近[24],因此本研究将FLake模式用于对布哈河入湖口水温的模拟。

1.3.2 *模拟试验设计* 为了评估FLake模式、驱动数据对布哈河入湖口水温模拟的适用性及预估布哈河入湖口水温演变,本研究设计了3组试验,分别使用不同数据驱动FLake模式模拟布哈河入湖口水温,驱动数据包括不同再分析数据(CMFD、ERA5-Land)和CMIP6的不同模式数据(CMCC-CM2-SR5、MIROC6、MPI-ESM1-2-LR),模式中水深根据布哈河入湖口平均深度设为1 m,得到的模拟结果为混合层水温,ERA5-Land数据驱动FLake模型的模拟时间步长为1 h,CMFD和CMIP6三个模式的模拟时间步长为3 h,具体如下:

(1) 采用CMFD、ERA5-Land再分析数据分别驱动FLake模式模拟布哈河入湖口2008年7—9月水温变化,短期CMFD、ERA5-Land及两者模拟结果的集合分别表示为S_{CMFD-S}、$S_{ERA5-Land-S}$、S_{Comb-S},评估FLake模式对于布哈河入湖口水温模拟的适应性。

(2) 分别用CMFD、ERA5-Land再分析数据、CMIP6三个模式数据驱动FLake模式,利用替代观测数据的再分析数据驱动FLake模式的模拟结果评估CMIP6模拟驱动的模拟结果,长时间序列CMFD及ERA5-Land的模拟结果集合、历史时期CMIP6三个模式的模拟结果及模拟结果的集合分别表示为S_{Comb-L}、S_{CMCC-H}、$S_{MIROC6-H}$、S_{MPI-H}、S_{Comb-H},并进一步对比分析CMIP6多模式集合的长时间序列模拟水温变化特征。

(3) 分别用CMIP6三个模式驱动FLake模式对未来时期(2024—2100年)三种不同排放情景下的布哈河入湖口水温模拟,预估多模式集合模拟水温演变。

2 结果与分析

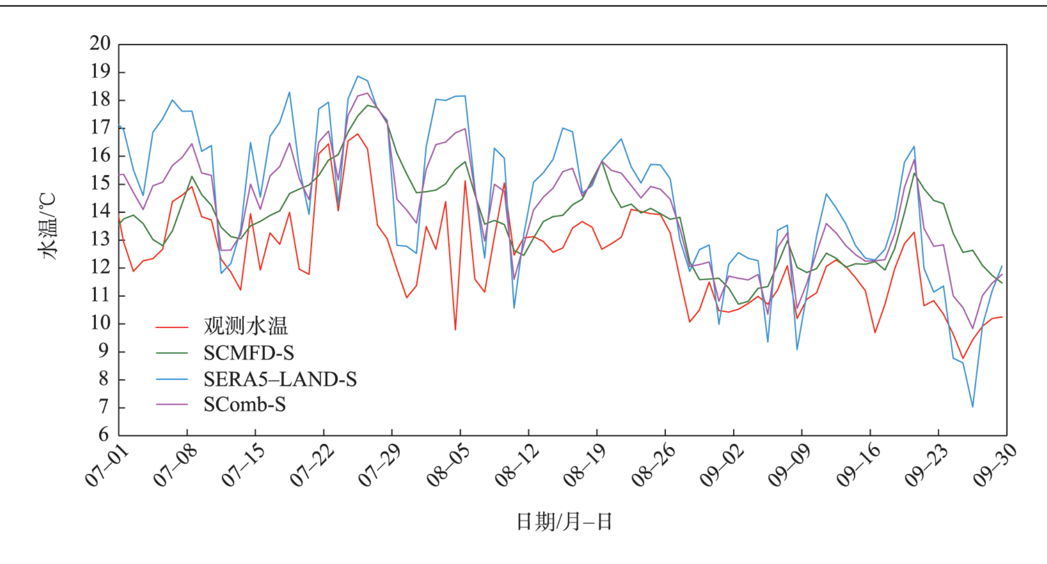
2.1 观测和模拟的布哈河入湖口2008年7—9月水温

布哈河入湖口2008年7—9月观测的水温在8.8~16.8 ℃,最高水温出现在7月26日,平均水温为12.4 ℃[25]。如图2所示,S_{CMFD-S}、$S_{ERA5-Land-S}$、S_{Comb-S}的模拟水温与观测水温波动呈一致性,相关系数(r)分别为0.64、0.81、0.82,偏差分别为1.43 ℃、1.94 ℃、1.54 ℃,

表1 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中三个模式基本信息

Tab. 1 Basic information about three models in Coupled Model Intercomparison Projects 6(CMIP6)

序号	模式名称	所属国家	研发机构
1	CMCC-CM2-SR5	意大利	地中海气候变化研究中心
2	MIROC6	日本	日本海洋地球科学与技术局、大气海洋研究所、国家环境变化研究所
3	MPI-ESM1-2-LR	德国	马克斯·普朗克气象研究所



注：S_{CMFD-S}、$S_{ERA5-Land-S}$和S_{Comb-S}分别为短期CMFD、ERA5-Land及两者集合的水温。

图2 2008年7—9月布哈河入湖口观测水温、模拟水温

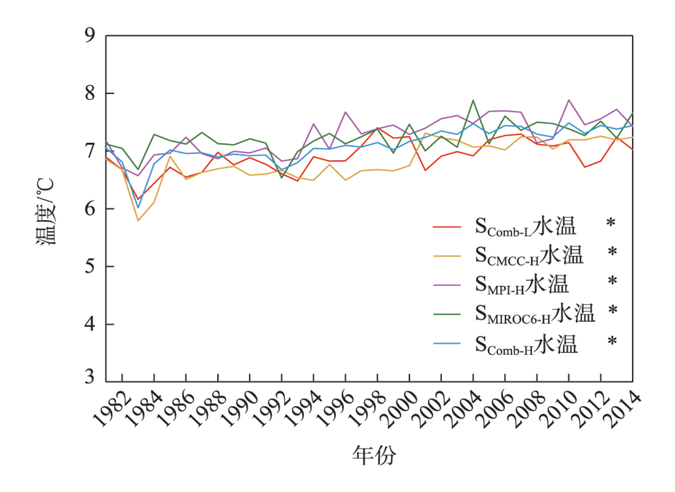
Fig. 2 Water temperature was observed and simulated in the estuary of Buha River from July to September 2008

均方根误差分别为1.92 ℃、2.76 ℃、1.96 ℃。CMFD和ERA5-Land再分析数据集合各个统计量均优于ERA5-Land，偏差及均方根误差略差于CMFD，但相关系数明显优于CMFD，说明CMFD和ERA5-Land在短期内量级可信，两者集合略优于单个模拟且FLake湖泊模式能够很好地适用于布哈河入湖口水温模拟。

2.2 历史时期布哈河入湖口水温变化特征

由于缺少长时间序列水温观测，本研究采用CMFD、ERA5-Land分别驱动FLake模式，集合两者模拟水温用作观测水温来评估CMIP6多模式及集合数据。为减少初始场的影响，本研究舍弃1979—1980年的模拟水温数据，计算1981—2014年S_{CMCC-H}、$S_{MIROC6-H}$、S_{MPI-H}、S_{Comb-H}与S_{Comb-L}的统计关系，评估CMIP6对于布哈河入湖口水温模拟的适应性。

模拟结果表明（图3），1981—2014年布哈河入湖口水温S_{Comb-L}、S_{CMCC-H}、$S_{MIROC6-H}$、S_{MPI-H}、S_{Comb-H}的多年平均水温分别为6.90 ℃、6.83 ℃、7.27 ℃、7.23 ℃、7.11 ℃，年际变率分别为0.17 ℃·$(10a)^{-1}$、0.27 ℃·$(10a)^{-1}$、0.26 ℃·$(10a)^{-1}$、0.14 ℃·$(10a)^{-1}$、0.22 ℃·$(10a)^{-1}$。S_{CMCC-H}、$S_{MIROC6-H}$、S_{MPI-H}、S_{Comb-H}的模拟水温与S_{Comb-L}的模拟水温相关系数（r）分别为0.56、0.67、0.51、0.70，分别表现为0.32 ℃、0.36 ℃、0.31 ℃、0.29 ℃的暖偏差，均方根误差分别为0.31 ℃、0.45 ℃、0.43 ℃、0.30 ℃，均通过95%的显著性检验。与单个模式相比，S_{Comb-H}与S_{Comb-L}的模拟水温相关性更好，偏差和均方根误差更小，多模式集合缩小了不同模式与CMFD和ERA5-Land



注：S_{Comb-L}、S_{CMCC-H}、$S_{MIROC6-H}$、S_{MPI-H}、S_{Comb-H}分别为长时间序列CMFD和ERA5-Land模拟水温的集合、历史时期CMIP6三个模式的模拟水温及模拟水温的集合。

图3 1981—2014年CMFD和ERA5-Land模拟水温的集合与CMIP6三个模式的模拟水温及模拟水温的集合

Fig. 3 The average simulated water temperature of CMFD and ERA5-Land, the single simulated water temperature of three models of CMIP6 and the average simulated water temperature of three models from 1981 to 2014

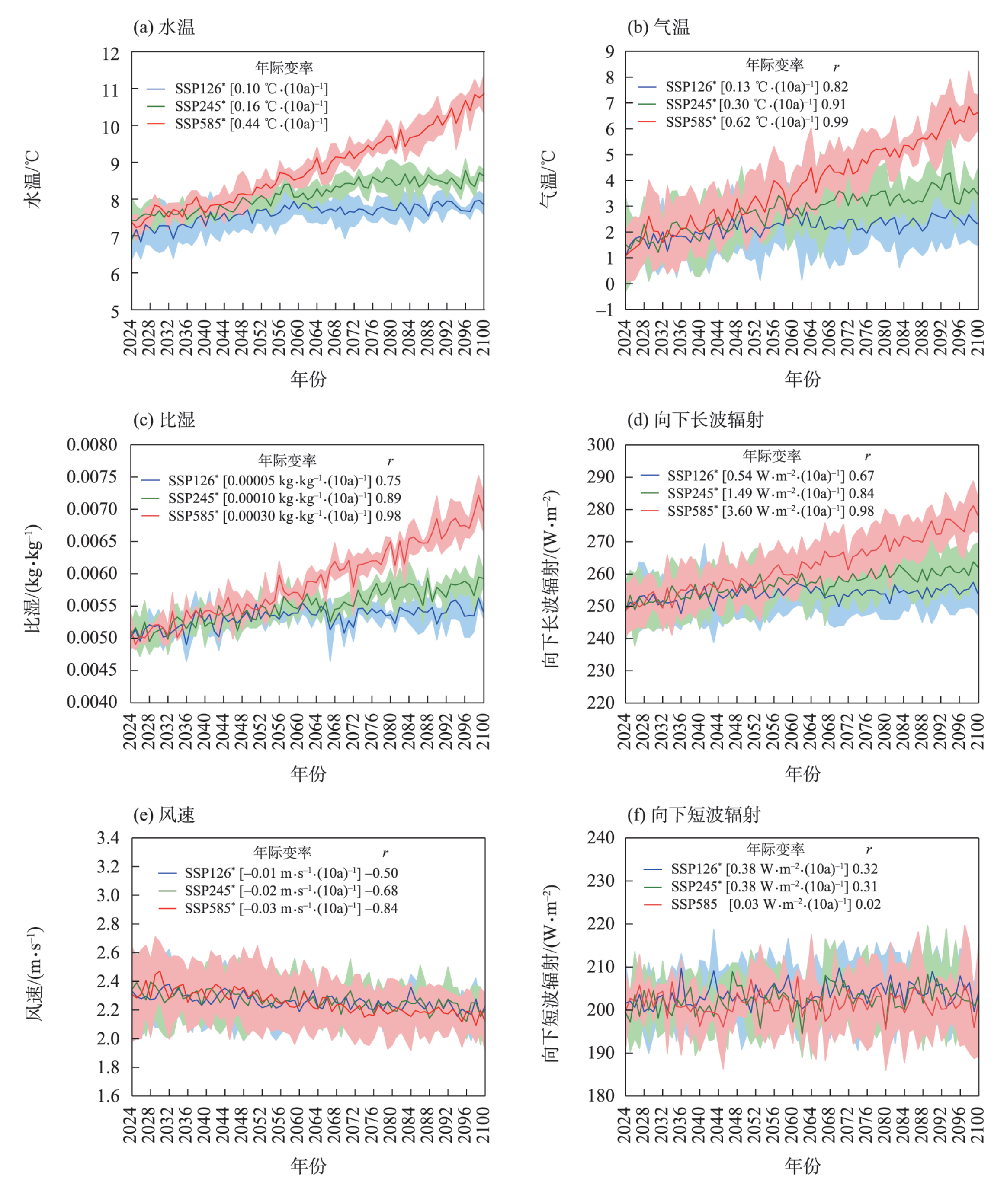
再分析数据集合之间的差异，能清晰地表示出水温的年际变化，可用CMIP6多模式集合数据分析布哈河入湖口水温变化。

2.3 未来时期布哈河入湖口水温变化特征

2.3.1 未来时期布哈河入湖口年均水温演变特征及影响因素 2100年SSP126（低强迫情景）、SSP245（中等强迫情景）、SSP585（高强迫情景）的年均模拟

水温分别为7.64 ℃、8.63 ℃、10.86 ℃,与1981年的年均模拟水温(7.05 ℃)对比分别升高了0.59 ℃、1.58 ℃、3.81 ℃。未来时期(2024—2100年)SSP126、SSP245、SSP585情景的模拟水温均呈升高趋势,升温速率分别为0.10 ℃·(10a)$^{-1}$、0.16 ℃·(10a)$^{-1}$、0.44 ℃·(10a)$^{-1}$($P\leqslant0.05$)(图4a),SSP126和SSP245情景的升温速率略低于历史时期[0.22 ℃·(10a)$^{-1}$],而处于高排放情景下的升温极其显著,升温速率分别为历史时期的2倍,SSP245情景的2.75倍,SSP126情景的4.4倍。

气温是影响湖泊、河流水温变化的主要因素,气温升高使得湖泊、河流水温明显上升[38]。SSP126、SSP245、SSP585情景气温的年际变率分别为0.13 ℃·(10a)$^{-1}$、0.30 ℃·(10a)$^{-1}$、0.62 ℃·(10a)$^{-1}$,均高于相同



注:阴影区表示正负一个标准差的结果,*表示通过了95%显著性检验。

图4　2024—2100年CMIP6三个模式集合的各情景气象要素

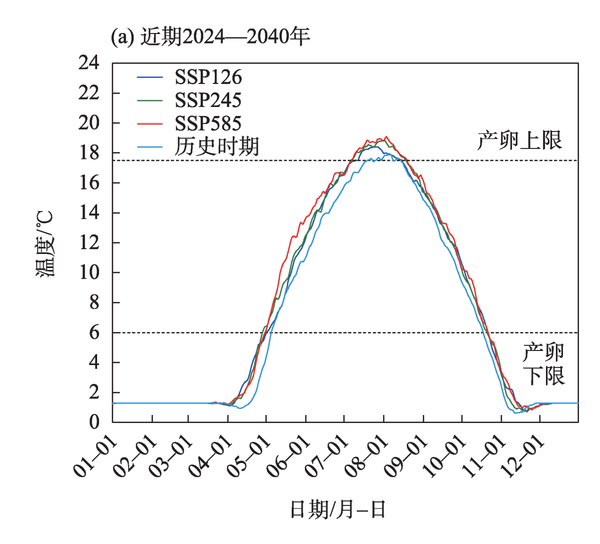
Fig. 4　Meteorological elements of each scenario averaged by CMIP6 three models from 2024 to 2100

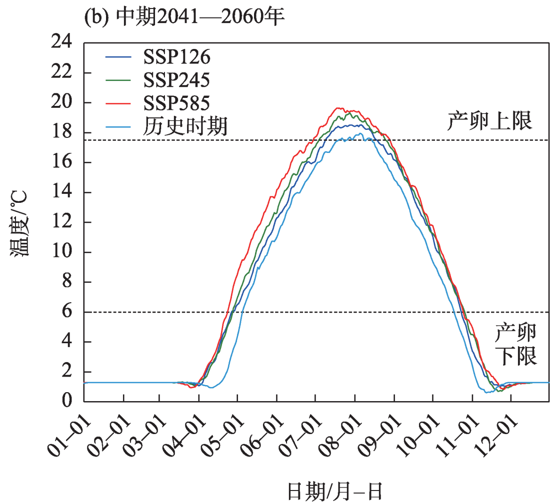
情景下模拟水温的年际变率，各情景模拟水温年际变化与气温的相关系数(r)分别为0.82、0.91、0.99(图4b)，SSP585情景下模拟水温与气温的相关性最高。比湿也是影响湖泊水温变化的重要因素之一[39]，SSP126、SSP245、SSP585情景比湿的年际变率分别为0.00005 kg·kg^{-1}·(10a)$^{-1}$、0.00010 kg·kg^{-1}·(10a)$^{-1}$、0.00030 kg·kg^{-1}·(10a)$^{-1}$，模拟水温年际变化与比湿的r分别为0.75、0.89、0.98(图4c)，仅略小于气温与水温的相关性。向下长波辐射是表层水温的能量来源之一[10]，三种情景的向下长波辐射分别以0.54 W·m^{-2}·(10a)$^{-1}$、1.49 W·m^{-2}·(10a)$^{-1}$、3.60 W·m^{-2}·(10a)$^{-1}$的年际变化趋势增加，模拟水温与向下长波辐射的r分别为0.67、0.84、0.98(图4d)。降低的风速与模拟水温呈负相关，减少的风速会使水体蒸发量减少[40]，促进模拟水温升高，各情景下风速分别以0.01 m·s^{-1}·(10a)$^{-1}$、0.02 m·s^{-1}·(10a)$^{-1}$、0.03 m·s^{-1}·(10a)$^{-1}$的趋势下降，模拟水温与风速的r分别为−0.50、−0.68、−0.84(图4e)。不同排放情景的向下短波辐射的年际变率按排放强度由低到高分别为0.38 W·m^{-2}·(10a)$^{-1}$、0.38 W·m^{-2}·(10a)$^{-1}$、0.03 W·m^{-2}·(10a)$^{-1}$，模拟水温年际与向下短波辐射的相关性较低且向下短波辐射波动较小(图4f)，对模拟水温升高的影响也较小。

综上所述，在各种气象因子共同作用下，随着排放强度的增加，未来布哈河入湖口的水温将显著升高。与升高的模拟水温呈正相关的气象因子依次为气温、比湿和向下长波辐射，呈负相关的气象因子是风速；向下短波辐射与模拟水温相关性很小，可忽略其对模拟水温的影响。除远期SSP585情景的向下短波辐射，其他情景的气象因素均通过了95%的显著性检验，并且模拟水温与各气象因素的相关系数还会受到排放强度的影响，水温与气温、比湿、向下长波辐射及风速的相关系数均随排放强度的升高而升高。

2.3.2 未来时期布哈河入湖口逐日多年水温演变特征 历史时期布哈河入湖口日均最高水温为17.96 ℃，水温平均在5月5日达到了6.0 ℃(青海湖裸鲤产卵下限水温[41-42])，在7月20日达到了17.5 ℃(裸鲤产卵上限水温[41])，并且有23 d的水温超过17.5 ℃。

近期(2024—2040年)不同情景间水温的差异并不显著，均略高于历史时期的模拟水温。SSP126、SSP245、SSP585情景的日均最高水温分别为18.41 ℃、18.85 ℃、19.09 ℃(图5a)，三种情景较历史时期水温达到裸鲤产卵下限(6.0 ℃)的日期分别提前了3 d、6 d、4 d，水温超过17.5 ℃的平均天数分别为38 d、42 d、44 d。





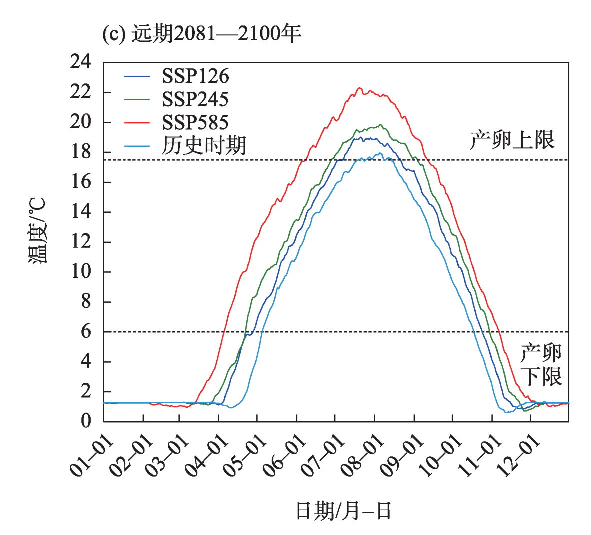


图5 三种情景不同阶段逐日多年模拟水温

Fig. 5 Three scenarios simulate water temperature daily and multi-year at different stages

中期(2041—2060年)不同情景下模拟水温间的差异随着排放情景的升高而逐渐显现。三种情景日均最高模拟水温分别为18.52 ℃、19.32 ℃、19.65 ℃,SSP585情景的日均最高水温比SSP126情景高出了1.13 ℃(图5b)。SSP126、SSP245、SSP585三种情景较历史时期水温达到6.0 ℃的日期分别提前6 d、8 d、11 d,水温超过17.5 ℃的平均天数随排放情景的升高而增大,分别为40 d、53 d、60 d。

远期(2081—2100年)随着气候的变暖三种不同情景下模拟水温的差异越来越大,SSP585情景的升温更加迅速(图5c)。SSP126、SSP245情景的日均最高模拟水温分别为19.02 ℃、19.85 ℃,而SSP585情景甚至已经比历史时期高出4.34 ℃,达到了22.30 ℃,三种情景下水温达到6.0 ℃的日期分别提前了8 d、13 d、29 d,水温超过17.5 ℃的平均天数分别为45 d、64 d、84 d。

3　讨 论

与历史时期相比,未来时期(2024—2100年)三种情景下每年水温达到产卵下限水温(6.0 ℃)和达到产卵上限(17.5 ℃)的日期均提前出现(图6a,图6b),最后达到产卵上限水温(17.5 ℃)的日期均有所推迟(图6c)。至本世纪末,随着排放情景的升高,每年首次达到17.5 ℃的日期提前更多天出现,最后达到17.5 ℃的日期延迟多天出现,导致青海湖裸鲤在较暖期不产卵的天数大大增加。

近期(2024—2040年)三种情景下水温超过17.5 ℃的平均天数比6.0 ℃提前出现的天数分别多12 d、13 d、17 d,导致青海湖裸鲤产卵窗口期缩短,水温变化对裸鲤的产卵已有轻微影响;中期(2041—2060年)水温超过的17.5 ℃的平均天数比6.0 ℃提前出现的天数分别多了11 d、22 d、26 d,产卵窗口期

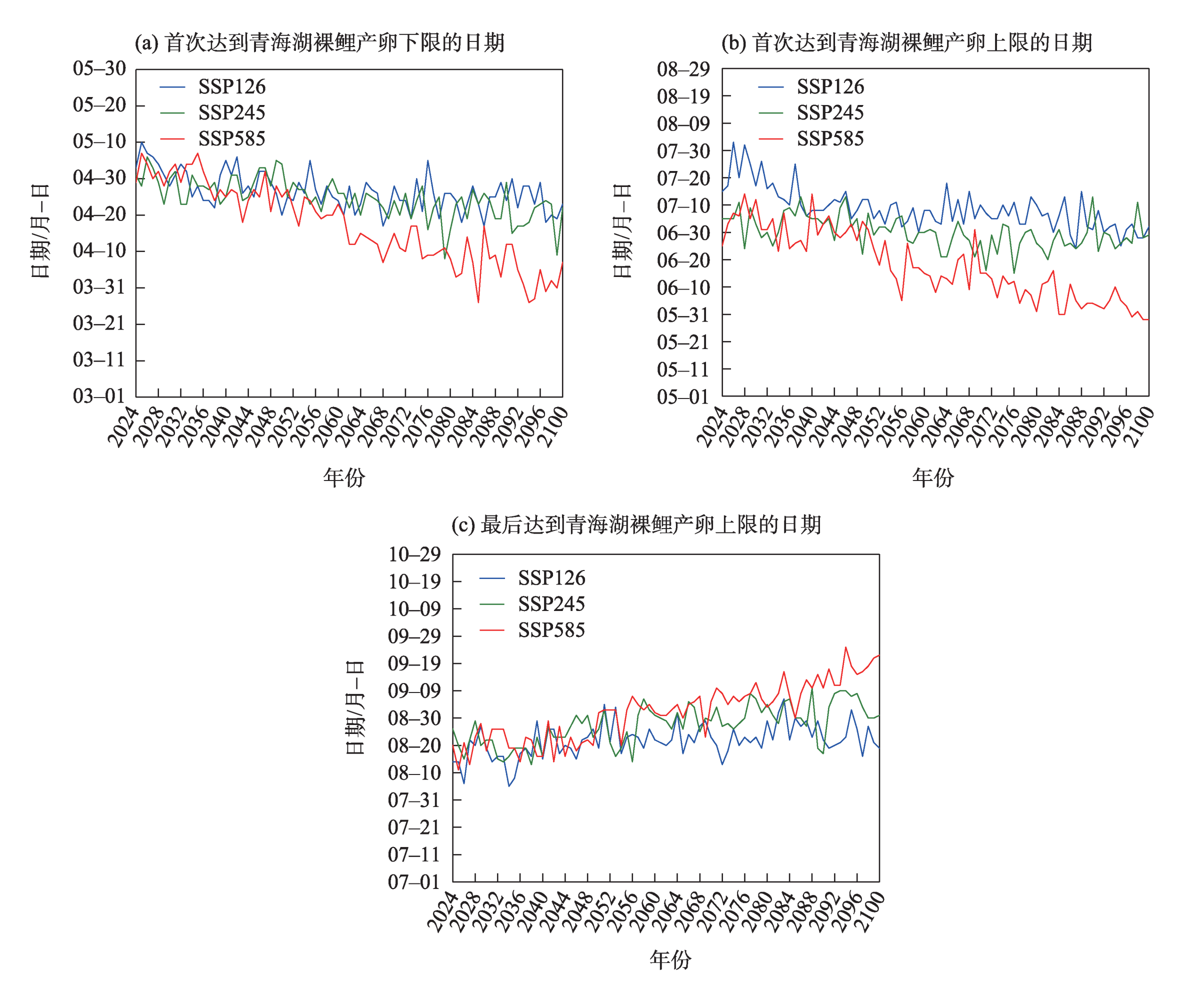


图6　2024—2100年每年首次达到青海湖裸鲤产卵(a)下限、(b)上限的日期及(c)最后达到青海湖裸鲤产卵上限的日期

Fig. 6　The date of first reaching (a) lower limit, (b) upper limit and (c) the date of last reaching the upper limit of spawning in *Gymnocypris przewalskii* per year from 2024 to 2100

缩短天数更多,水温升高逐渐不利于裸鲤产卵;远期(2081—2100年)三种情景水温超过17.5 ℃的平均天数比6.0 ℃提前出现的天数多了14 d、29 d、43 d,产卵场窗口期显著缩短,水温升高已极大程度地限制了青海湖裸鲤的产卵活动,使得青海湖裸鲤处于较高风险中。

4 结 论

本研究以CMFD及ERA5-Land再分析数据、CMIP6多模式常规气象数据作为驱动数据,利用FLake湖泊模式对布哈河入湖口历史(1979—2014年)及未来(2024—2100年)时期水温进行了模拟研究,分析了布哈河入湖口未来时期水温的演变特征及影响因子,分阶段探讨了水温的日均演变特征及其对青海湖裸鲤产卵的影响,主要结论如下:

(1) FLake湖泊模式能够较好地应用于对布哈河入湖口水温的模拟。CMFD和ERA5-Land模拟水温的集合优于单个模式的模拟水温且在短期和长期模拟结果精度都较好;CMIP6多模式长期的模拟水温集合优于单个模式的模拟水温,可以较好的再现再分析数据模拟水温的集合。

(2) 未来时期布哈河入湖口的水温随着排放强度的增加而显著升高,与水温呈正相关的气象因子依次为气温、比湿、向下长波辐射和向下短波辐射,呈负相关的气象因子是风速;除远期SSP585情景的向下短波辐射,其他情景的气象因子均通过了95%的显著性检验。

(3) 近期(2024—2040年),三种情景的水温与历史时期相比有少许升高,水温间的差异不大,青海湖裸鲤产卵的窗口期略微缩短,水温升高会对裸鲤的产卵造成轻微影响;中期(2041—2060年),三种情景的水温进一步升高,水温间的差异逐渐显现,裸鲤的产卵窗口期明显缩短,水温升高对裸鲤的产卵有一定的危害;远期(2081—2100年),三种情景的水温差异更显著,SSP126和SSP245情景的升高速率减慢;SSP585情景的水温升高速率依旧加快,水温比历史时期高出4.34 ℃,水温超过17.5 ℃的天数比6 ℃提前出现的天数多了43 d,水温持续升高导致裸鲤的产卵窗口期显著缩短,一定程度限制了青海湖裸鲤的产卵活动。

参考文献(References):

[1] Wang Hong, Long Huiling, Li Xiaobing, et al. Evaluation of changes in ecological security in China's Qinghai Lake Basin from 2000 to 2013 and the relationship to land use and climate change[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(2): 341-354.

[2] Zhao Wei, Xiong Donghong, Wen Fengping, et al. Lake area monitoring based on land surface temperature in the Tibetan Plateau from 2000 to 2018[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(8): 084033.

[3] 叶博文, 孙标, 史小红, 等. 1989—2021年蒙新高原湖泊时空特征及驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2024, 36(4): 1252-1269. [Ye Bowen, Sun Biao, Shi Xiaohong, et al. Temporal and spatial characteristics and driving forces of lakes in the Mongolia-Xinjiang Plateau during 1989-2021[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(4): 1252-1269.]

[4] IPCC. Climate change: Work group Icon tribution to the IPCC fifth assessment report (AR5)[R]. Switzerland: IPCC, 2013.

[5] Jane S F, Hansen G J A, Kraemer B M, et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes[J]. Nature, 2021, 594(7861): 66-70.

[6] 王欣, 连文皓, 魏俊锋, 等. 青藏高原水资源现状与问题[J]. 水科学进展, 2023, 34(5): 812-826. [Wang Xin, Lian Wenhao, Wei Junfeng, et al. Status and problems of water resources on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(5): 812-826.]

[7] Sharma S, Gray D K, Read J S, et al. A global database of lake surface temperatures collected by in situ and satellite methods from 1985-2009[J]. Scientific Data, 2015, 2(1): 1-19.

[8] Zhang Guoqing, Yao Tandong, Xie Hongjie, et al. Estimating surface temperature changes of lakes in the Tibetan Plateau using MODIS LST data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(14): 8552-8567.

[9] Wan Wei, Zhao Limin, Xie Hongjie, et al. Lake surface water temperature change over the Tibetan Plateau from 2001-2015: A sensitive indicator of the warming climate[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(20): 11177-11186.

[10] Huang Lei, Wang Junbo, Zhu Liping, et al. The warming of large lakes on the Tibetan Plateau: Evidence from a lake model simulation of Nam Co, China, during 1979-2012[J]. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 2017, 122(24): 13095-13107.

[11] 董靖玮. 气候变化下青海湖水温演变及其对裸鲤影响的预估研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023. [Dong Jingwei. Prediction of Water Temperature Change in Qinghai Lake and Its Effect on Gymnocypris Przewalskii under Climate Change[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.]

[12] 袁博, 周孝德, 宋策, 等. 黄河上游高寒区河流水温变化特征及影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 59-65. [Yuan Bo, Zhou Xiaode, Song Ce, et al. Analysis of water temperature

changes and influencing factors in the alpine zone of Yellow River Upstream[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(12): 59-65.]

[13] 熊明, 邹珊, 姜彤, 等. 长江源区河流水温对气候变化的响应[J]. 人民长江, 2018, 49(14): 48-54. [Xiong Ming, Zou Shan, Jiang Tong, et al. Response of river water temperature to climate change in source regions of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2018, 49(14): 48-54.]

[14] Michie L E, Thiem J D, Facey J A, et al. Effects of suboptimal temperatures on larval and juvenile development and otolith morphology in three freshwater fishes: Implications for cold water pollution in rivers[J]. Environmental Biology of Fishes, 2020, 103(12): 1527-1540.

[15] Davis M J, Woo I, Ellings C S, et al. A climate-mediated shift in the estuarine habitat mosaic limits prey availability and reduces nursery quality for juvenile salmon[J]. Estuaries and Coasts, 2022, 45(5): 1445-1464.

[16] Isaak D J, Wollrab S, Horan D, et al. Climate change effects on stream and river temperatures across the Northwest US from 1980-2009 and implications for salmonid fishes[J]. Climatic Change, 2012, 113: 499-524.

[17] 黄屾, 李长忠, 李梓瑄, 等. 盐度对青海湖裸鲤生长及渗透调节基因的影响[J]. 水产科学, 2022, 41(4): 527-536. [Huang Shen, Li Changzhong, Li Zixuan, et al. Effects of different salinities on growth and osmotic regulation gene expression of *Gymnocypris przewalskii*[J]. Fisheries Science, 2022, 41(4): 527-536.]

[18] 董靖玮, 文莉娟, 于涛, 等. 青海湖湖温预估研究[J]. 干旱气象, 2024, 42(1): 64-74. [Dong Jingwei, Wen Lijuan, Yu Tao, et al. Prediction of the future temperature in Qinghai Lake[J]. Journal of Arid Meteorology, 2024, 42(1): 64-74.]

[19] 祝存兄, 史飞飞, 乔斌, 等. 基于高分1号卫星数据的青海湖扩张及湖滨沙地变化特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1076-1089. [Zhu Cunxiong, Shi Feifei, Qiao Bin, et al. Analysis of Qinghai Lake expansion and lakeside sandy land change characteristics based on GF-1 satellite[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1076-1089.]

[20] 李沁园, 张思九, 林育青, 等. 近十年青海湖水生态系统生产总值变化及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2024, 36(3): 963-974. [Li Qinyuan, Zhang Sijiu, Lin Yuqing, et al. Changes and impacts factors of gross aquatic ecosystem product of Qinghai Lake in recent ten years[J]. Journal of Lake Sciences, 2024 36(3): 963-974.]

[21] 莫皓焜, 胡光印, 孟惠聪. 青海湖地区风沙活动研究进展[J]. 中国沙漠, 2023, 43(6): 197-209. [Mo Haokun, Hu Guangyin, Meng Huicong. Research progress on aeolian activity in the Qinghai Lake area, northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(6): 197-209.]

[22] 谢廷锋, 和雅静, 赵永晶, 等. 青海湖入湖河流大型底栖动物时空分布及渔产潜力估算[J]. 水生态学杂志, 2023, 44(3): 70-78. [Xie Tingfeng, He Yajing, Zhang Yongjing, et al. Tempora-spatial distribution and potential fish production capacity of macrozoobenthos in the main inflow Rivers of Qinghai Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2023, 44(3): 70-78.]

[23] 陈含墨. 基于底栖动物的布哈河生态水文模型[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. [Chen Hanmo. Eco-hydrological Model of Buha River Based on Macroinvertebrates[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.]

[24] 宗荷花. 布哈河流域河水碳组分特征及其来源探究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2023. [Zong Hehua. Characteristics of Carbon Components of River Water in the Buha River Basin and Its Sources[D]. Yantai: Ludong University, 2023.]

[25] 张宏, 谭细畅, 史建全, 等. 布哈河青海湖裸鲤鱼苗鱼卵的时空分布研究[J]. 生态科学, 2009, 28(5): 443-447. [Zhang Hong, Tan Xichang, Shi Jianquan, et al. Spatial and temporal distribution of *Gymnocypris przewalskii* larvae in the Buha River of the Qinghai Lake[J]. Ecological Science, 2009, 28(5): 443-447.]

[26] He Jie, Yang Kun, Tang Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. Scientific Data, 2020, 7: 1-11.

[27] 温婷婷, 郭英香, 董少睿, 等. 1979—2017年CRU、ERA5、CMFD格点降水数据在青藏高原适用性评估[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 684-697. [Wen Tingting, Guo Yingxiang, Dong Shaorui, et al. Assessment of CRU, ERA5, CMFD grid precipitation data for the Tibetan Plateau from 1979 to 2017[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 684-697.]

[28] Ma Ning, Szilagyi J, Niu Guoyue, et al. Evaporation variability of Nam Co Lake in the Tibetan Plateau and its role in recent rapid lake expansion[J]. Journal of Hydrology, 2016, 537: 27-35.

[29] 王坤鑫, 张寅生, 张腾, 等. 1979—2017年青藏高原色林错流域气候变化分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 652-662. [Wang Kunxin, Zhang Yinsheng, Zhang Teng, et al. Analysis of climate change in the Selin Co Basin, Tibetan Plateau, from 1979 to 2017 [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 652-662.]

[30] Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(9): 4349-4383.

[31] 卢冬燕, 朱秀芳, 刘婷婷, 等. 2 ℃温升情景下中国气象干旱特征变化[J]. 干旱区地理, 2023, 46(8): 1227-1237. [Lu Dongyan, Zhu Xiufang, Liu Tingting, et al. Changes in meteorological drought characteristics in China under the 2 ℃ temperature rise scenario [J]. Arid Land Geography, 2023, 46(8): 1227-1237.]

[32] 戴君, 胡海珠, 毛晓敏, 等. 基于CMIP6多模式预估数据的石羊河流域未来气候变化趋势分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(10): 1547-1562. [Dai Jun, Hu Haizhu, Mao Xiaomin, et al. Future climate change trends in the Shiyang River Basin based on the CMIP6 multi-model estimation data[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(10): 1547-1562.]

[33] Chen Rong, Duan Keqin, Shang Wei, et al. Increase in seasonal precipitation over the Tibetan Plateau in the 21st century projected using CMIP6 models[J]. Atmospheric Research, 2022, 277: 106306.

[34] Mironov D, Heise E, Kourzeneva E, et al. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO[J]. Boreal Environment Research, 2010, 15(2): 218−230.

[35] Stepanenko V M, Martynov A, Jöhnk K D, et al. A one-dimensional model intercomparison study of thermal regime of a shallow, turbid midlatitude lake[J]. Geoscientific Model Development, 2013, 6(4): 1337−1352.

[36] 苏东生, 胡秀清, 文莉娟, 等. 青海湖热力状况对气候变化响应的数值研究[J]. 高原气象, 2018, 37(2): 394−405. [Su Dongsheng, Hu Xiuqing, Wen Lijuan, et al. Simulation of the response of Qinghai Lake thermal conditions to climate change[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(2): 394−405.]

[37] Su Dongsheng, Hu Xiuqing, Wen Lijuan, et al. Numerical study on the response of the largest lake in China to climate change[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(4): 2093−2109.

[38] 王仁军, 刘宝康, 黄炳婷. 1986—2019年哈拉湖面积动态变化及其成因分析[J]. 人民珠江, 2021, 42(1): 20−25, 33. [Wang Renjun, Liu Baokang, Huang Bingting. Analysis of dynamic change and causes of the area of Hala Lake from 1986 to 2019[J]. Pearl River, 2021, 42(1): 20−25, 33.]

[39] Rangwala I, Miller J R, Russell G L, et al. Using a global climate model to evaluate the influences of water vapor, snow cover and atmospheric aerosol on warming in the Tibetan Plateau during the twenty-first century[J]. Climate Dynamics, 2010, 34(6): 859−872.

[40] 袁康, 谭德宝, 赵静, 等. 近十年可可西里盐湖水量变化及其影响因素分析[J]. 人民长江, 2022, 53(5): 111−117. [Yuan Kang, Tan Debao, Zhao Jing, et al. Analysis on water volume changes and influencing factors of 68 Daoban Salt Lake in Hoh Xil in recent ten years[J]. Yangtze River, 2022, 53(5): 111−117.]

[41] 谈龙飞, 徐东坡, 祁洪芳, 等. 沙柳河青海湖裸鲤早期资源发生量及时空分布[J]. 水生生物学报, 2022, 46(2): 265−272. [Tan Longfei, Xu Dongpo, Qi Hongfang, et al. The spatial and temporal distribution in early life history stages of *Gymnocypris przewalskii* in Shaliu River[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2022, 46(2): 265−272.]

[42] 周杨浩, 荣义峰, 周卫国, 等. 人工模拟条件下青海湖裸鲤自然繁殖环境条件需求研究[J]. 水生生物学报, 2022, 46(6): 779−787. [Zhou Yanghao, Rong Yifeng, Zhou Weiguo, et al. Environmental requirements of natural reproduction of *Gymnocypris przewalskii* under artificial simulated conditions[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2022, 46(6): 779−787.]

A preliminary study on the evolution of water temperature in the estuary of the Qinghai Lake

XIE Gang[1], WANG Tiantian[1,2,3], YU Tao[1], DONG Jingwei[2,3], CHEN Shiqiang[2,3], WANG Mengxiao[2,3], ZHANG Shengjie[2,3], ZHANG Haoming[2,3]

(1. College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Cryospheric Science and Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Qinghai Lake Comprehensive Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Gangcha 812300, Qinghai, China)

Abstract: Under the influence of global warming, the temperature of lakes and rivers in the Qinghai-Xizang Plateau has increased significantly, and the change is closely related to the breeding of aquatic organisms. However, there are few studies on the water temperature at the estuary of rivers, which is an important place for the migration and spawning of *Gymnocypris przewalskii* in Qinghai Lake, and the influence of water temperature change on the spawning of *G. przewalskii* is still unclear. Therefore, this study is based on the observation data of Gangcha Meteorological Station, China Meteorological Forcing Dataset (CMFD), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis v5−Land (ERA5−Land) and Coupled Model Intercomparison Projects 6 (CMIP6). The Fresh water Lake Model (FLake Model) is used to simulate the water temperature at the estuary of Buha River, the largest tributary of Qinghai Lake, and evaluate its applicability. It also discusses the superiority of reanalysis and CMIP6 multi-model data to drive the collection of simulated historical water temperatures (1981−2014). The evolution and causes of water temperature under three scenarios in the future period (2024−2100) are estimated. The results show that: (1) Average water temperature simulated by CMFD and ERA5−Land was better than that of the single model, and the accuracy of the simulation results was better in both short and long terms, of the average simulated water temperature of CMIP6 multi-model was better than that of a single model, which reproduced the simulated water temperature of reanalysis data set effectively. (2) In the future, the water temperature at the estuary of the Buha River may increase significantly with the increase of emission intensity. The meteorological factors that were positively correlated with the water temperature are air temperature, specific humidity, downward long wave radiation and downward short wave radiation from the largest to the smallest, while the wind speed was negatively correlated is; except for the downward short-wave radiation of the long-term high emission scenario (SSP585), the meteorological factors of the others all passed the 95% significance test. (3) In the recent period (2024−2040), the water temperature under the three scenarios may elevate slightly, increased compared with the historical period, and there is little difference between the water temperatures. The spawning window period of *G. przewalskii* is slightly shortened, and the rising water temperature will have a slight impact on the spawning of *G. przewalskii*. In the middle period (2041−2060), the water temperature of the three scenarios increased further, and the difference between the water temperatures gradually appeared. The spawning window period of *G. przewalskii* was obviously shortened, and the rising water temperature had certain harm to the spawning of *G. przewalskii*. In the long term (2081−2100), the water temperature difference between the three scenarios is more significant, and the rise rate of SSP126 and SSP245 scenarios slows down. In the SSP585 scenario, the rate of water temperature rise was still accelerated, and the continuous rise of water temperature resulted in a significant shortening of the spawning window period of *G. przewalskii*, which limited the spawning activities of *G. przewalskii* to a certain extent.

Keywords: estuary of Buha River; FLake model; CMIP6 estimation; water temperature; Qinghai Lake